

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 4 (2023)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/SMUR2431>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.
к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов Т. А.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А.И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Кошеков К.Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е.В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Оспанова Н. Н.,	<i>к.п.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А.Р.,	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/QRBQ9000>

***Д. Б. Борзекоев¹, А. Л. Козловский², Д. И. Шлимас³
А. Н. Бергузинов⁴**

^{1,2,3}Институт ядерной физики МЭ РК, Республика Казахстан, г. Алматы,

^{2,3}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;

⁴Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

*e-mail: d.borgekov@inp.kz

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ Nb_2O_5 -MoN-AlN ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

В работе представлены результаты оценки прочностных свойств многослойных тонкопленочных покрытий на основе соединений Nb_2O_5 -MoN-AlN, полученных методом магнетронного напыления на поверхности стали марки 316 L. Выбор компонент для покрытий обусловлен возможностью повышения устойчивости к внешним воздействиям за счет высоких показателей прочностных характеристик данных покрытий, а также их структурных особенностей. С применением метода рентгенофазового анализа было установлено, что вариация количества слоев и компонент приводит к формированию аморфных покрытий. В качестве методов для определения прочностных характеристик были применены методы индентирования и определения коэффициента сухого трения. В случае нанесения двухкомпонентных многослойных покрытий, установлено, что твердость увеличивается на 10–20 %, а в случае трехкомпонентных покрытий увеличение твердости составило более чем 50 %. При испытаниях на износостойкость полученных покрытий было установлено, что нанесение на сталь марки 316 L двух-трехкомпонентных покрытий приводит к увеличению устойчивости к износу стали более чем в 7–10 раз, при этом профиль износа значительно меньше за счет высокой устойчивости покрытий к износу.

Ключевые слова: магнетронное напыление, многослойные тонкопленочные покрытия, нитрид алюминия, твердость, упрочнение.

Введение

Разработки в области изучения способов повышения устойчивости материалов к внешним воздействиям, включая механические воздействия, процессам коррозии и охрупчиванию, возникающих в процессе эксплуатации являются одними из ключевых направлений в современном материаловедении [1,2]. При этом повышение устойчивости классических сталей за счет нанесения на них тонкослойных защитных покрытий является одним из наиболее перспективных направлений в данной отрасли. В основе данного направления лежит технология нанесения тонких оксидных, нитридных или карбидных покрытий металлов (кристаллических или аморфных), которые обладают более высокими показателями прочности, твердости, а также являются химически инертными материалами, что в случае воздействия с агрессивными средами приводит к снижению скорости коррозии и деградации металлических сплавов и сталей [3–5]. При этом разнообразие методов нанесения покрытий и тонких пленок позволяет получать структуры с различным фазовым и элементным составом, различной толщины, а также морфологическими особенностями, включая геометрию зерен и форму их соединений [5,6]. При этом вариация условий получения пленок и покрытий также открывает возможности для изменения свойств получаемых покрытий, что в дальнейшем используется для модификации поверхности материалов и увеличения их трибологических характеристик [7–9]. Большой интерес к нитридным и оксидным покрытиям обусловлен возможностями увеличения температуры воздействия на материал, так как данные типы покрытий, в особенности, нитридные обладают высокой термической стабильностью, что позволяет использовать их в экстремальных условиях [10,11]. Также немаловажную роль в определении эффективности повышения прочностных свойств играет вариация компонент составов покрытий или возможность получения покрытий путем варьирования слоев различных компонент, в результате которого получают многослойные покрытия по типу «сэндвичей». Подобные покрытия обладают повышенной устойчивостью к механическим воздействиям, которое обусловлено граничными эффектами, возникающими при вариации слоев [12,13]. В ряде работ использование подобных структур (многослойных покрытий) позволило получить высокопрочные радиационностойкие покрытия, способные увеличить устойчивость сталей к газовому набуханию [14,15]. В связи с этим интерес к подобным исследованиям, в особенности в последние несколько лет, достаточно большой, так как проблема повышения устойчивости материалов

к внешним воздействиям, включая механические воздействия, коррозию и термическое воздействие является ключевой задачей в материаловедении и конструкционных материалах.

Цель данной работы заключается в изучении влияния варьирования количества компонент в многослойных тонкопленочных покрытиях на основе $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-MoN-AlN}$, полученных методом магнетронного напыления на поверхности стали марки 316 L, на изменение прочностных характеристик, а также износостойкость покрытий к механическому трению. Выбор метода магнетронного напыления обусловлен возможностью контролируемого получения многослойных покрытий заданной толщины, с контролируемыми параметрами структуры, а также возможностью получения слоев, обладающих высокими прочностными и коррозионными показателями устойчивости.

Материалы и методы

В качестве объектов для исследований были выбраны многослойные тонкопленочные покрытия на основе $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-MoN-AlN}$ полученные методом магнетронного напыления на поверхности стали 316L. Толщина нанесенных покрытий составляла не более 1 мкм. Определение толщины было осуществлено с применением метода эллисометрии. Для получения многослойных покрытий были выбраны вариации составов пленок

На рисунке 1 представлено схематичное изображение получаемых многослойных тонкопленочных покрытий на основе $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-MoN-AlN}$ полученных методом магнетронного напыления. Данная схема отражает расположение слоев для получения многослойных покрытий из двух или трех компонент. В случае двухкомпонентных покрытий количество слоев составляло по три каждого из компонент, в случае трехкомпонентных покрытий количество каждого выбранного слоя также составляло по три. Контроль за толщиной слоя осуществлялся на основе априорных данных об условиях напыления, путем соблюдения всех требований к параметру нанесения слоев и последующей смене катодов. Максимальная толщина слоя составляла порядка 150–170 нм.

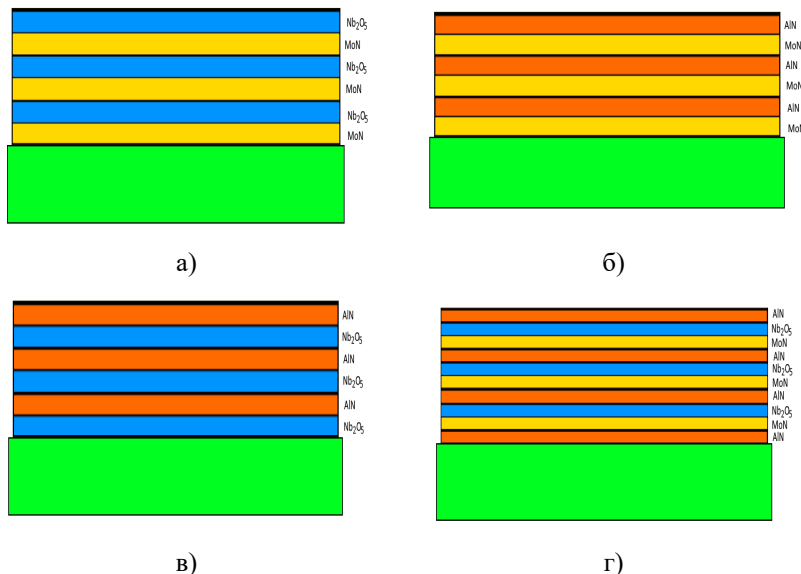


Рисунок 1 – Схематическое изображение полученных многослойных тонкопленочных покрытий при варьировании количества слоев (двух и трех компонентных составов): а) Nb_2O_5 – MoN; б) AlN – MoN; в) AlN – Nb_2O_5 ; г) AlN – Nb_2O_5 – MoN

Для определения структурных особенностей полученных покрытий в зависимости от вариации количества слоев и компонент был применен метод рентгенофазового анализа, который был реализован на рентгеновском дифрактометре D8 Advance ECO (Bruker, Берлин, Германия).

Определение твердости было осуществлено с применением метода индентирования (в качестве индентера использовалась пирамида Виккерса). Измерения проводились с использованием микротвердомера Duroline M1 (Metkon, Бурса, Турция). Нагрузка на индентер составляла порядка 1 кН, выбор величины нагрузки обусловлен условиями измерений на глубине, характерной толщине покрытий.

Испытания на измерение коэффициента сухого трения, а также определения эффективности увеличения устойчивости покрытий к внешним воздействиям было выполнено с использованием трибометра UNITEST 750 (Ducom Instruments, Бенгалуру, Индия). Испытания проводились путем последовательных испытаний с помощью индентера в форме шарика, который воздействовал на поверхность при нагрузке 100 Н. Количество циклов повторений трения составило 20,000.

Определение скорости износа было осуществлено путем сравнительного анализа изменений коэффициента сухого трения образцов в начале испытаний и после 20,000 циклов испытаний с учетом изменений профиля износа, а также прошедшего пути индентера по поверхности образцов.

Результаты и обсуждение

Результаты рентгенофазового анализа исследуемых образцов многослойных покрытий показали отсутствие каких – либо регистрируемых дифракционных рефлексов, характерных для хорошо структурированных кристаллических покрытий, что свидетельствует о рентгеноаморфной природе получаемых покрытий с применением метода магнетронного напыления (см. Рисунок 2). Подобный эффект аморфности получаемых покрытий может быть объяснен либо малыми размерами кристаллитов (порядка нескольких нм), из которых состоят слои наносимых покрытий, что не позволяет зарегистрировать кристаллическую фазу в нанесенных покрытиях, либо тот факт, что при получении покрытий степень структурного их упорядочения достаточно низкая, что приводит к отсутствию каких – либо явно проявленных дифракционных рефлексов. Аморфная природа пленок также может быть объяснена тем, что напыление проводилось при комнатной температуре, для которой как было показано в работе [16] наблюдается формирование аморфных структур.

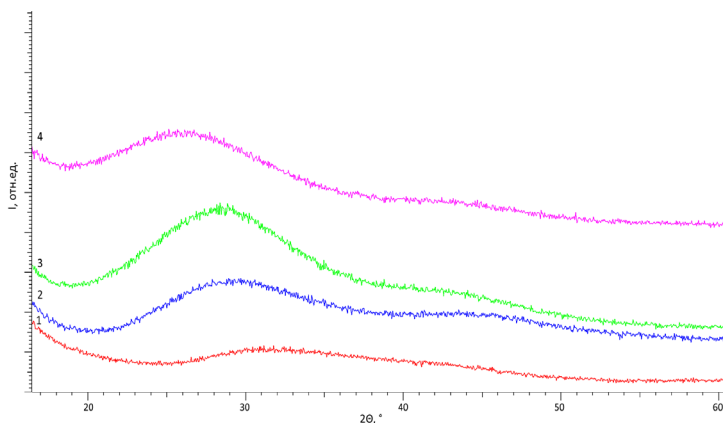


Рисунок 2 – Результаты рентгенофазового анализа исследуемых покрытий:
1) $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{MoN}$; 2) $\text{AlN} - \text{MoN}$; 3) $\text{AlN} - \text{Nb}_2\text{O}_5$; 4) $\text{AlN} - \text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{MoN}$

Одними из важных характеристик для которых используются покрытия являются прочностные свойства, в том числе повышение твердости образцов,

а также устойчивости к износу при механическом трении или постоянном или длительном воздействии на поверхность деталей.

На рисунке 3 представлены результаты оценки величины твердости, которая была определена методом индентирования. В качестве сравнительной величины представлено значение твердости для стали 316L без нанесенного покрытия. Общий вид представленных данных изменений твердости показал, что в случае использования двухкомпонентных покрытий, варьирование которых при получении многослойных покрытий, приводит к увеличению твердости поверхности с 1.53 ГПа до 1.75–1.8 ГПа, в то время как для трехкомпонентных покрытий твердость увеличивает до 2.46 ГПа. Такое изменение твердости обусловлено прочностными свойствами покрытий, а также вариацией количества слоев, которое приводит к увеличению количества граничных эффектов, оказывающих сопротивление при внешних воздействиях, а также увеличивая трещиностойкость покрытий.

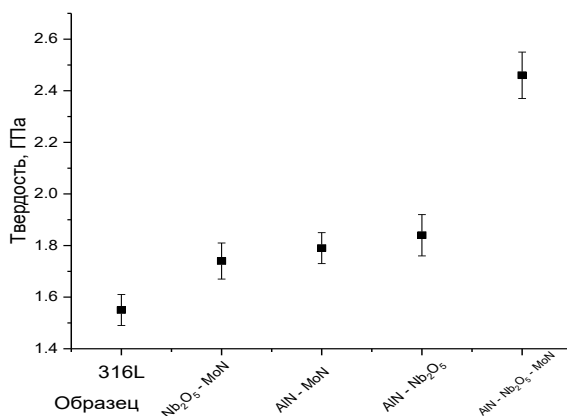


Рисунок 3 – Результаты изменения твердости образцов покрытий в сравнении с результатами для стали 316L

На рисунке 4 представлены результаты оценки упрочнения, которые отражают изменение устойчивости к растрескиванию при внешних воздействиях, которые были рассчитаны на основе данных изменений величин твердости покрытий в сравнении с результатами твердости стали без покрытия.

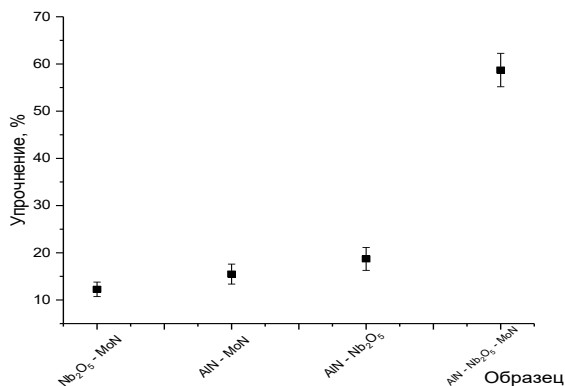


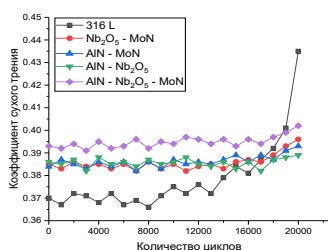
Рисунок 4 – Результаты оценки упрочнения образцов многослойных покрытий в сравнении с данными твердости для стали 316L

Как видно из представленных данных, в случае двухкомпонентных покрытий варьирование типа компонент (замена оксида ниобия на нитрид алюминия или же нитрид молибдена на оксид ниобия) не приводит к существенной разнице в изменении величины упрочнения, изменение которой для двухкомпонентных покрытий составляет порядка 15–20 % в сравнении с величиной твердости для стали 316L. При этом получение трехкомпонентных покрытий приводит к увеличению упрочнения в сравнении со сталью 316L более чем на 50 %, и в 2.5–3 раза выше при сравнении с данными упрочнения в случае двухкомпонентных покрытий. При этом увеличение твердости, и как следствие, упрочнение покрытий при переходе от двух компонентных покрытий к трем компонентным покрытиям с увеличением количества слоев, а также уменьшению их толщины, может быть обусловлено эффектом межслойных границ, увеличение которых в случае трехкомпонентных сплавов обуславливает формирование дополнительных барьеров для распространения трещин при внешних воздействиях.

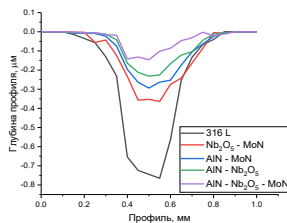
Эффективность упрочнения за счет вариации количества наносимых слоев в многослойных покрытиях была показана в работе [17], согласно которой увеличение количество слоев в двух компонентных сплавах приводит к увеличению устойчивости к растрескиванию, а также твердости наносимых покрытий. В свою очередь в работе [18] также показана эффективность вариации условий напыления на увеличение устойчивости к внешним воздействиям и повышение прочностных характеристик покрытий, что является хорошим подтверждением полученных результатов.

На рисунке 5 представлены результаты изучения прочностных свойств покрытий в ходе ресурсных испытаний на определение износостойкости покрытий при воздействии на них индентера в форме шарика. Количество циклов в ходе испытаний составляло порядка 20,000 циклов, в ходе которых были определены величины коэффициента сухого трения. После испытаний был определен профиль износа (глубина профиля и его ширина).

В случае нанесенных покрытий наблюдается незначительное увеличение коэффициента сухого трения в сравнении со сталью 316L, которое объясняется формированием дополнительной шероховатости при нанесении покрытий, а также в результате вариации количества слоев и типа наносимых компонент.



а)



б)

Рисунок 5 – а) Результаты оценки изменений коэффициента сухого трения для исследуемых образцов в зависимости от количества циклов испытаний; б) Результаты оценки профиля повреждений после 20,000 циклов испытаний на устойчивость к трению

Как видно из представленных данных, наиболее явное изменение коэффициента сухого трения наблюдается при достижении более 10,000–12,000 циклов испытаний. При этом наиболее выраженные эти изменения наблюдаются для стали 316L, в то время как для образцов с нанесенными покрытиями увеличение коэффициента сухого трения наблюдается только после 17,000–18,000 циклических воздействий. Анализ профиля износа также явно отражают эффективность устойчивости к внешним воздействиям при механических испытаниях.

На рисунке 6 представлены результаты оценки скорости износа покрытий в сравнении с данными износа для стали марки 316L, полученные в результате испытаний на износ при механическом воздействии индентера

в ходе определения коэффициента сухого трения. Полученные данные отражают устойчивость нанесенных покрытий, а также увеличение устойчивости к износостойкости поверхности, отражающие эффективность упрочнения и повышения стабильности материалов к трению.

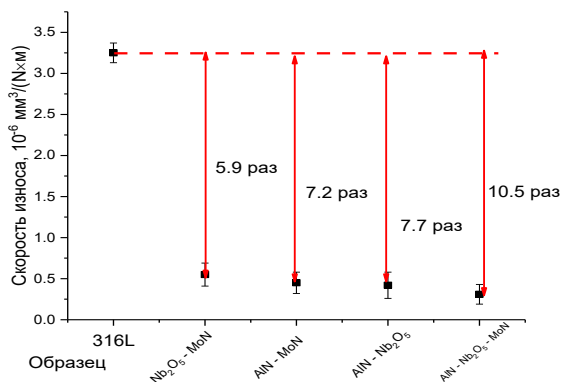


Рисунок 6 – Результаты сравнительного анализа скорости износа стали в зависимости от типа нанесенного покрытия

Общий вид полученных результатов оценки скорости износа при определении коэффициента сухого трения видно, что использование покрытий, нанесенных на поверхность стали 316L приводит к снижению износа более чем в 6–7 раз для двухкомпонентных покрытий, и более чем в 10 раз для трехкомпонентных покрытий. Такое различие в скорости деградации поверхности (скорости износа) свидетельствует о высокой эффективности использования двух и трехкомпонентных многослойных покрытий для повышения устойчивости поверхности стали к износу и механическим воздействиям.

Выводы

В ходе проведенных исследований было установлено, что в случае трехкомпонентных многослойных покрытий наблюдается увеличение твердости и упрочнения выше 50 % в сравнении с образцами стали, а также более чем в 2,5 раза выше, чем полученные значения твердости многослойных покрытий состоящих из двух компонент. При этом в ходе проведенных исследований прочностных характеристик установлено, что увеличение прочности для двухкомпонентных многослойных покрытий величина упрочнения составляет порядка 15–20 % и слабо зависит от

вариации состава компонент. В ходе определения устойчивости покрытий к износостойкости при определении коэффициента сухого трения было установлено, что нанесения покрытий на поверхность стали приводит к снижению скорости износа поверхности в ходе длительного количества циклов испытаний составило более чем в 7–10 раз в сравнении с износом для сталей без покрытий.

Информация о финансировании. Данная работа выполнена в рамках реализации программно-целевого финансирования BR21882390 «Разработка технологии решений создания и модификации высокопрочных, тугоплавких, жаропрочных композитных керамик и ТОТЭ элементов для альтернативной энергетики и приборостроения» при поддержке КН МНВО РК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Baskaran R. et al.** Increased upper critical field for nanocrystalline MoN thin films deposited on AlN buffered substrates at ambient temperature // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2016. – Vol. 49. №. 20. – P. 205304.

2 **Hallett L. et al.** Superconducting MoN thin films prepared by DC reactive magnetron sputtering for nanowire single-photon detectors // *Superconductor Science and Technology*. – 2021. – Vol. 34. № 3. – P. 035012.

3 **Anğay F. et al.** Structure, stress, and mechanical properties of Mo-Al-N thin films deposited by dc reactive magnetron cosputtering: Role of point defects // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 2020. – Vol. 38, № 5. – P.1–10.

4 **Tabbal M. et al.** Pulsed laser deposition of c-axis oriented aluminum nitride thin films on silicon // *The European Physical Journal Applied Physics*. – 2001. – Vol. 14. № 2. – P. 115-119.

5 **Baskaran R. et al.** Superconducting fluctuations in molybdenum nitride thin films // *Physica C: Superconductivity and its Applications*. – 2018. – Vol. 545. – P. 5–9.

6 **Kang L. et al.** Fabrication and characterization of NbN, AlN and NbN/AlN/NbN on MgO substrates // *Superconductor Science and Technology*. – 2003. – Vol. 16. № 12. – P. 1417.

7 **Panwar R., Dhingra A., Kumar D.** Study of thermal stability behavior of MoN & WN thin films in ULSI // *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. – 2011. – Vol. 1. № 3. – P. 55.

8 **Hahn R. et al.** Mechanistic study of superlattice-enabled high toughness and hardness in MoN/TaN coatings // *Communications Materials*. – 2020. – Vol. 1–№1. – P. 62.

9 **Aita, C. R.** Tailored ceramic film growth at low temperature by reactive sputter deposition // Critical reviews in solid state and materials sciences. – 1998. – Vol. 23. №. 3. – P. 205–274.

10 **Hultman, L.** Thermal stability of nitride thin films // Vacuum. – 2000. – Vol. 57, №. 1. – P. 1–30.

11 **Ren Y. et al.** Effect of Ag contents on the microstructure and tribological behaviors of NbN–Ag coatings at elevated temperatures // Vacuum. – 2022. – Vol. 204. – P. 111330.

12 **Bhardwaj N. et al.** Improved RF-DC characteristics and reduced gate leakage in GaN MOS-HEMTs using thermally grown Nb₂O₅ gate dielectric // Physica Scripta. – 2022. – Vol. 98. №. 1. – P. 015805.

13 **Silva C. et al.** Interface structures in Al–Nb₂O₅ nanocomposites processed by high-pressure torsion at room temperature // Materials Characterization. – 2020. – Vol. 162. – P. 110222.

14 **Uglov, V. V. et al.** Structural and Phase Changes in Concentrated V–Nb–Ta–Ti Solid Solutions Irradiated by Helium Ions // Journal of Surface Investigation : X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Vol. 17. – № 1. – P. 208–215.

15 **Ryskulov, A. E. et al.** Microstructural stability and mechanical properties of the system V–Nb–Ta–Ti under helium ion irradiation // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. – 2022. – P. 1216–1222.

16 **Haberkorn N. et al.** Synthesis of nanocrystalline δ -MoN by thermal annealing of amorphous thin films grown on (100) Si by reactive sputtering at room temperature // Thin solid films. – 2018. – Vol. 660. – P. 242–246.

17 **Gao, Z. et al.** Ab initio supported development of TiN/MoN superlattice thin films with improved hardness and toughness // Acta Materialia. – 2022. – Vol. 231. – P. 117871.

18 **Bouaouina B. et al.** Correlation between mechanical and microstructural properties of molybdenum nitride thin films deposited on silicon by reactive RF magnetron discharge // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 333. – P. 32–38.

Принято к изданию 28.11.23.

*Д. Б. Боргеков¹, А. Л. Козловский^{1,2}, Д. И. Шлимас^{1,2},
А. Н. Бергузинов³

¹Ядролық физика институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ;

²Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ;

³Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
Басып шығаруға 28.11.23 қабылданды.

МАГНЕТРОНДЫ БҮРКУ ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН Nb_2O_5 - MoN - AlN НЕГІЗІНДЕГІ ЖҰҚА ҚАБЫҚШАЛЫ ЖАБЫНДАРДЫҢ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ СИПАТТАМАСЫ

Жұмыста 316 L маркалы болат бетіне магнетронды бүрку әдісімен алынған Nb_2O_5 - MoN - AlN қосылыстарына негізделген көп қабатты жұқа қабықшалы жабындардың беріктік қасиеттерін бағалау нәтижелері келтірілген. Жабындарға арналған компоненттерді таңдау осы жабындардың беріктік сипаттамаларының жоғары көрсеткіштері, сондай-ақ олардың құрылымдық ерекшеліктері есебінен сыртқы әсерлерге төзімділікті арттыру мүмкіндігіне байланысты. Рентгендік фазалық талдау әдісін қолдана отырып, қабаттар мен компоненттер санының өзгеруі аморфты жабындардың пайда болуына әкелетіні анықталды. Беріктік сипаттамаларын анықтау әдістері ретінде құрғақ үйкеліс коэффициентін анықтау және анықтау әдістері қолданылды. Екі компонентті көп қабатты жабындарды қолданған жағдайда қаттылық 10–20 %-ға артады, ал үш компонентті жабындар жағдайында қаттылықтың жоғарылауы 50 %-дан асады. Алынған жабындардың тозуға төзімділігін сынау кезінде 316 L маркалы болатқа екі-үш компонентті жабындарды қолдану болаттың тозуға төзімділігін 7–10 еседен астам арттыруға әкелетіні анықталды. Бұл жағдайда тозу профилі жабындардың тозуға төзімділігі жоғары болғандықтан айтарлықтай аз болады.

Кілтті сөздер: магнетронды бүрку, көп қабатты жұқа қабықшалы жабындар, алюминий нитрид, қаттылық, қатаю.

*D. B. Borgekov¹, A. L. Kozlovskiy^{1,2}, D. I. Shlimas^{1,2},
A. N. Berguzinov³

¹Institute of Nuclear Physics, Republic of Kazakhstan, Almaty,

²L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;

³Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar,

Accepted for publication on 28.11.23.

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF THIN-FILM COATINGS BASED ON Nb_2O_5 -MoN-AlN OBTAINED BY MAGNETRON SPUTING METHOD

The paper presents the assessment results of the strength properties of multilayer thin-film coatings based on Nb_2O_5 -MoN-AlN compounds obtained by magnetron sputtering on the surface of 316 L steel. The choice of components for coatings is determined by the possibility of enhancing resistance to external influences due to the high strength characteristics of these coatings, as well as their structural features. Using the X-ray phase analysis method, it was found that varying the number of layers and components leads to the formation of amorphous coatings. The methods used to determine the strength characteristics were indentation and determination of the dry friction coefficient. In the case of application of two-component multilayer coatings, it was found that hardness rises by 10–20 %, and in the case of three-component coatings, the growth in hardness was more than 50 %. When testing the wear resistance of the resulting coatings, it was found that application of two-three-component coatings to 316 L steel results in an elevation in the wear resistance of the steel by more than 7–10 times, while the wear profile is significantly smaller due to the high wear resistance of the coatings.

Keywords: magnetron sputtering, multilayer thin-film coatings, aluminum nitride, hardness, hardening.

Теруге 28.11.2023 ж. жіберілді. Басуға 29.12.2023 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс №4175

Сдано в набор 28.11.2023 г. Подписано в печать 29.12.2023 г.

Электронное издание

29.9 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4175

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz